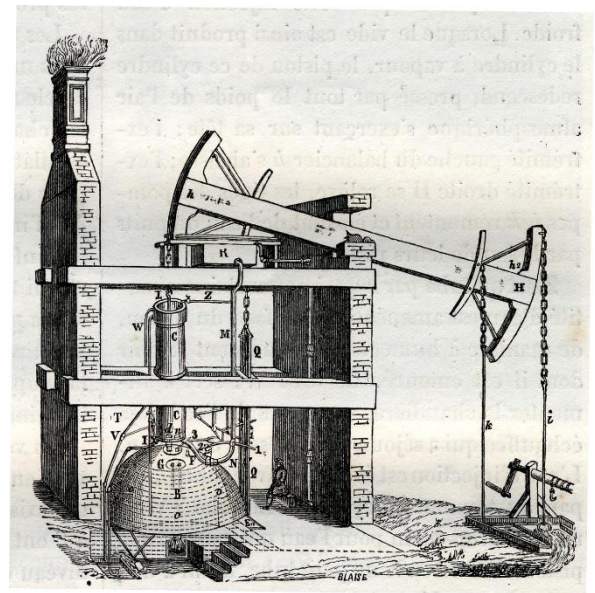


§26. Преобразование тепла в механическую энергию.

Цикл Карно

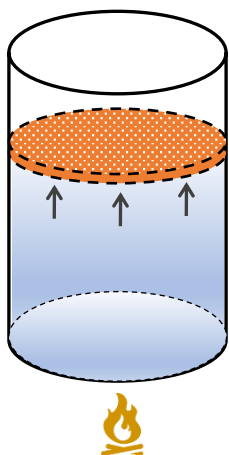
Создание и развитие науки о теплоте – термодинамики было вызвано, прежде всего, необходимостью описания работы и расчета тепловых машин. Её первоначальная задача сводилась к изучению закономерностей превращения тепла в механическую работу в тепловых двигателях и изучению условий, при которых такое превращение является наиболее оптимальным.

Первыми тепловыми машинами были паровые двигатели, предназначенные для подъема воды из шахт. Они были изобретены английскими инженерами в 1698 году Томасом Севери и в 1712 году Томасом Ньюкоменом. Широкое применение паровых машин в промышленности началось после изобретения в 1774 году Джеймсом Уаттом паровой машины, в которой работа совершалась без использования атмосферного давления, что значительно сократило расход топлива.

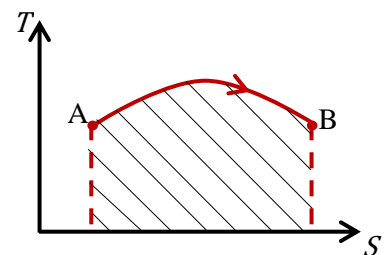


Гравюра второго двигателя Ньюкомена, установленного приблизительно в 1714 в угольной шахте Гриф в Уоркшире.

Сейчас разработано большое количество разнообразных тепловых машин, в которых реализованы различные термодинамические циклы. Тепловые машины или тепловые двигатели предназначены для получения полезной работы за счет теплоты, выделяемой вследствие химических реакций (сгорание топлива), ядерных превращений или по другим причинам (например, вследствие нагрева солнечными лучами).



Если нагревать газ, находящийся в цилиндрическом сосуде под плотно пригнанным поршнем, то, расширяясь, газ поднимет поршень, совершив механическую работу за счет подводимого к нему тепла. Проблема лишь в том, этот процесс быстро закончится – расширение газа ограничено размерами цилиндра. Для возможности промышленного применения такой системы необходимо, чтобы работа совершалась в течение длительного времени. Значит,



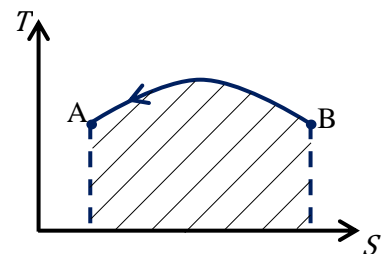
необходимо возвращать газ в исходное состояние, после чего его можно было бы опять нагревать.

Пусть А – начальное состояние системы (газа) до нагрева, В – конечное состояние системы, когда нагрев закончен, и работа совершена. Построим процесс нагрева в координатах (T, S) , тогда тепло подводимое к системе можно будет наглядно представить как площадь под графиком процесса:

$$Q_{AB} = \int_A^B T dS.$$

$$dS > 0 \Rightarrow Q_{AB} > 0 \text{ – тепло к системе подводится.}$$

Будем использовать для перевода системы из состояния А в состояние В только обратимые процессы, попробуем вернуть систему в исходное состояние, т.е. из состояния В в состояние А. Это можно делать по-разному, например, тем же самым путём, но в обратном направлении. Обратимость процесса АВ позволяет это сделать. Но тогда нам придётся отобрать от системы столько же тепла, сколько мы до этого подвели к ней, и совершить над системой такую же работу, которую только что она сама совершила:

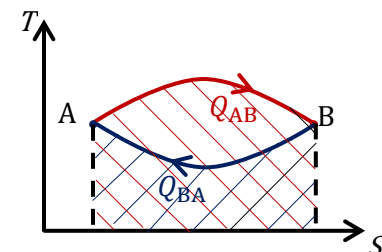


$$Q_{BA} = \int_B^A T dS.$$

$$dS < 0 \Rightarrow Q_{BA} < 0 \text{ – тепло от системы отводится.}$$

Площади под кривыми равны $s_{AB} = s_{BA} \Rightarrow Q_{AB} = |Q_{BA}|$.

Понятно, что полезной работы от такой системы нам не будет. Но можно переводить систему в исходное состояние и любым другим процессом, например, как на рисунке. В этом случае мы отберём от системы не всё тепло что подвели Q_{AB} , а только часть его $s_{AB} > s_{BA} \Rightarrow Q_{AB} > |Q_{BA}|$.



В результате всех превращений мы вернули систему в исходное состояние А. Процесс, при котором система, пройдя через ряд превращений, возвращается в исходное состояние – называется *круговым процессом* или *циклом*. Т.к. наша система, совершив круговой процесс, вернулась в тоже самое исходное состояние, то изменение внутренней энергии системы в этом процессе равно нулю:

$\Delta U = U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}} = 0$. Количество теплоты, полученное системой в этом круговом процессе:
 $Q = Q_{AB} + Q_{BA}$, работа, совершённая системой A .

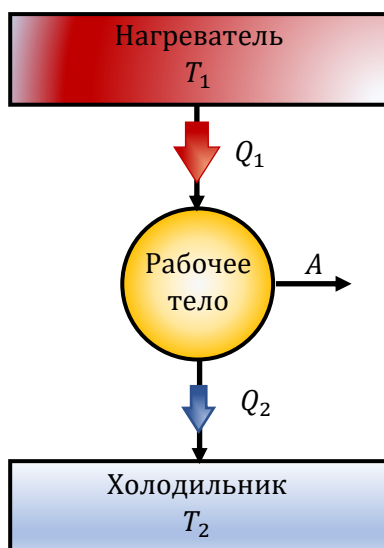
Первое начало термодинамики для нашего цикла: $Q_{AB} + Q_{BA} = \Delta U + A$ или

$Q_{AB} - |Q_{BA}| = A$. Значит, всё тепло, которое система получила в цикле, она перевела в работу.

$$Q_{AB} > |Q_{BA}| \Rightarrow A > 0.$$

Чтобы в цикле совершалась положительная работа, необходимо не только нагревать рабочее тело, но и охлаждать его, возвращая в исходное состояние (отбирать тепло) при более низкой температуре.

Периодически действующая система, совершающая работу за счёт подводимого из вне



тепла, называется *тепловой машиной*. Вещество, совершающее работу в тепловой машине, (газ или что-то другое) называется *рабочим телом*. Рабочее тело тепловой машины получает тепло от *нагревателя* – системы, чья температура выше температуры рабочего тела. Полученное тепло будем теперь обозначать $Q_1 = Q_{AB}$. А температуру нагревателя T_1 соответственно. Тепло Q_{BA} отдаётся рабочим телом *холодильнику* – системе, чья температура ниже температуры рабочего тела. Это тепло теперь будем обозначать $Q_2 = |Q_{BA}|$, температуру холодильника T_2 . Таким образом, в новых обозначениях первое начало

термодинамики примет следующий вид:

$$Q_1 - Q_2 = A.$$

Значит не всё тепло Q_1 , получаемое от нагревателя, можно потратить на совершение полезной работы:

$$A < Q_1.$$

Часть тепла равная Q_2 должна быть возвращена холодильнику для того, чтобы тепловая машина работала непрерывно, и следовательно, использовать её для совершения работы нельзя. Обычно в качестве холодильника используется окружающая среда, и Q_2 просто уходит на нагрев атмосферы. Тепловые машины принято характеризовать *коэффициентом полезного действия* (КПД), который определяется как отношение совершаемой в цикле работы к получаемому за цикл теплу:

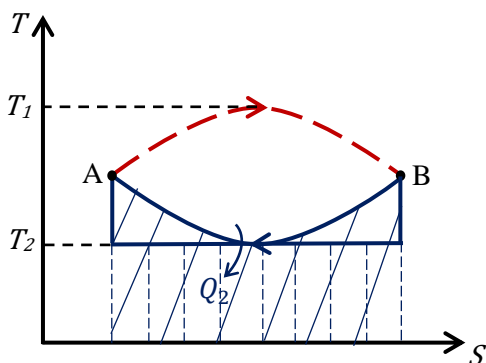
$$\eta = \frac{A}{Q_1}, \quad \eta < 1.$$

Из определения КПД следует, что он *никогда не может быть больше единицы*, но чем ближе он к ней, тем лучше тепловая машина.

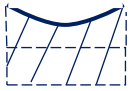
Используя первое начало термодинамики, записанное для цикла, получаем следующее выражение для КПД тепловой машины:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Для повышения эффективности работы тепловой машины – увеличения её КПД необходимо уменьшить дробь в правой части равенства. При заданных температурах нагревателя T_1 и холодильника T_2 надо придумать цикл, в котором мы сможем рабочему телу сообщать максимальное количество теплоты Q_1 , а отбирать от него минимальное количество теплоты Q_2 .

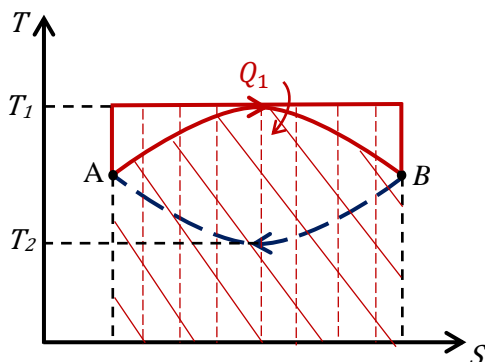


- уменьшение Q_2 .


Потребуем, чтобы рабочее тело отдавало тепло Q_2 не произвольным образом, а при минимальной температуре, равной температуре холодильника T_2 . Из графика видно, что площадь под исходной кривой произвольного процесса отвода тепла  больше, чем площадь под горизонтальной прямой. Значит,

количество теплоты Q_2 , отводимое от рабочего тела, тоже меньше, чем в исходном процессе. Q_2 уменьшается, а

$A = Q_1 - Q_2$ увеличивается и КПД тепловой машины тоже.



- увеличение Q_1 .

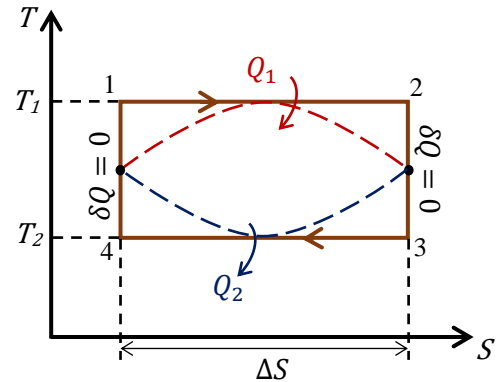
Так же мы можем потребовать, чтобы все тепло Q_1 передавалось от нагревателя рабочему телу при максимальной температуре – температуре нагревателя T_1 . В этом случае площадь под горизонтальной прямой подвода тепла будет  больше площади под кривой исходного процесса: Q_1

увеличивается, $\frac{Q_2}{Q_1}$ уменьшается, КПД тепловой машины растёт.

Никаких других способов повышения эффективности тепловой машины при заданных нагревателе и холодильнике нет. Следовательно, если заставить тепловую машину работать по циклу, в котором её рабочее тело будет получать тепло при постоянной температуре от

нагревателя, а отдавать тепло при постоянной температуре холодильника, то КПД такого цикла будет больше, чем КПД любого произвольного цикла, возможного для данной тепловой машины.

Что же за цикл у нас получился: две горизонтальные прямые – изотермы T_1 и T_2 , а также две вертикальные прямые, на которых энтропия постоянна. Как было показано в §25 процесс с постоянной энтропией также является адиабатическим процессом. Таким образом, наш цикл с максимальным КПД – это цикл, состоящий из двух изотерм 1 – 2, 3 – 4 и двух адиабат 2 – 3, 4 – 1.



Сосчитаем КПД нашего цикла.

Тепло, получаемое рабочим телом на изотерме T_1 участок 1 → 2:

$$Q_1 = \int_1^2 T dS = \int_1^2 T_1 dS = T_1 \int_1^2 dS = T_1 \Delta S$$

Тепло, отдаваемое рабочим телом на изотерме T_2 участок 3 → 4:

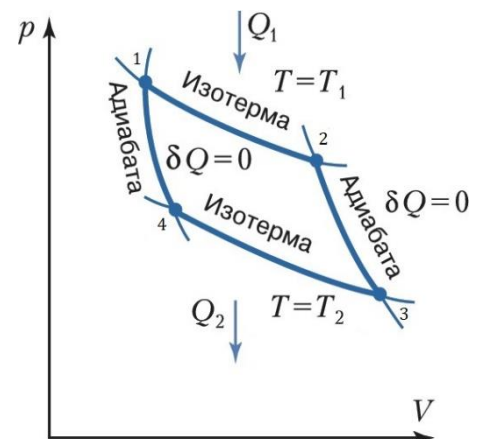
$$Q_2 = \left| \int_3^4 T dS \right| = \left| \int_3^4 T_2 dS \right| = T_2 \left| \int_3^4 dS \right| = T_2 \Delta S.$$

$$\eta_{max} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \Delta S}{T_1 \Delta S}.$$

$$\eta_{max} = \eta_{\text{Карно}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Цикл, обладающий максимальным значением коэффициента полезного действия при заданных температурах нагревателя и холодильника, называется *циклом Карно*.

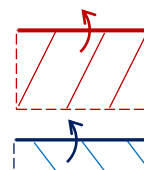
Поскольку в своём выводе мы не делали никаких предположений о свойствах рабочего тела и о самом устройстве тепловой машины, то справедливой является *теорема Карно*: коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно, зависит только от температур T_1 и T_2 нагревателя и холодильника, но не зависит от устройства машины, а также от вида используемого рабочего тела.



Перерисуем цикл Карно в координатах (P, V) .

Поскольку для нашего цикла мы договорились использовать только обратимые процессы, то он может быть проведён в обратном направлении. В этом случае рабочее тело никакой полезной работы совершать не будет, а наоборот, работу над ним будем совершать мы. Эта работа будет превращаться в теплоту, причём так что некоторое количества теплоты Q_2 , будет забираться от тела с более низкой температурой, т.е. холодильника, к этой теплоте добавляется за счёт работы эквивалентное количество теплоты и суммарное количество теплоты Q_1 будет передано телу с более высокой температурой, т.е. нагревателю.

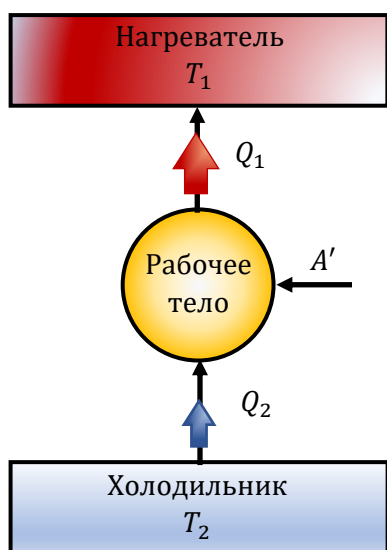
$$Q_2 + A' = Q_1$$



Из графика видно, что площадь под горизонтальной прямой отвода тепла больше, чем площадь под горизонтальной прямой подвода тепла. Значит, $A' = Q_1 - Q_2 > 0, A = -A' < 0$. Работу в таком цикле действительно совершаем мы, а не тепловая машина.

Следовательно, чистый результат такого цикла состоит в том, чтобы холодильник, от которого отнимается тепло, ещё больше охлаждался, а нагреватель, которому отдаётся теплота, ещё больше нагревался.

Тепловая машина, работающая по обратному циклу, называется *тепловым насосом*.



$$Q_2 = Q_{43} = \int_4^3 T dS = \int_4^3 T_2 dS = T_2 \int_4^3 dS = T_2 \Delta S -$$

теплота, отводимая от холодильника.

$$Q_1 = |Q_{21}| = \left| \int_2^1 T_1 dS \right| = T_1 \left| \int_2^1 dS \right| = T_1 \Delta S -$$

теплота, подводимая к нагревателю.

Если наиболее важным для нас является возможность теплового насоса в результате своей работы ещё больше понизить температуру холодильника, такой тепловой насос называется *холодильной машиной*.

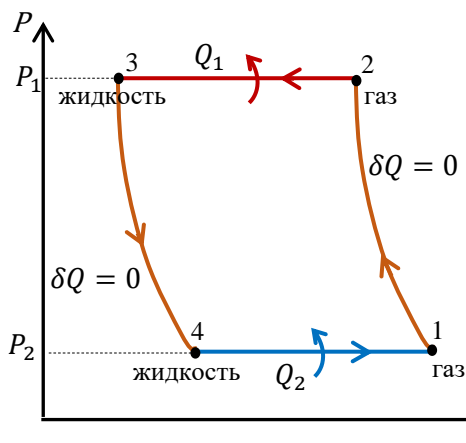
Коэффициент эффективности холодильной машины – отношение тепла, отбираемого от холодильника, к работе, которую пришлось совершить над рабочим телом:

$$k_{\text{х.м.}} = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Если принять во внимание, что отбор тепла от холодильника и передачу его нагревателю мы можем производить при постоянных температурах, то и в этом случае коэффициент эффективности холодильной машины не будет зависеть от её устройства и от используемого в ней рабочего тела:

$$k_{\text{х.м. Карно}} = \frac{T_2 \Delta S}{T_1 \Delta S - T_2 \Delta S} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Чем больше разность температур между холодильником и нагревателем, тем меньше эффективность холодильной машины – чтобы отобрать такое же количество тепла, надо совершить больше работы.



Большинство бытовых холодильников, кондиционеров и рефрижераторов устроены как холодильная машина. Рабочим телом является фреон – вещество при испарении активно поглощающее тепло, а затем выделяющее его при конденсации.

1 → 2: Компрессор: потребляя электрическую энергию из сети, превращает её механическую энергию, а точнее в работу, совершаемую над газом. В результате работы компрессора газ сжимается и нагревается:

$$dU + \delta A = 0 \text{ — первое начало термодинамики}$$

$$dU = \delta A'$$

Нагретый газ поступает в радиатор, расположенный на задней стенке холодильника (решётка).

2 → 3: Радиатор (конденсатор): газ охлаждается до комнатной температуры. В бытовых установках это участок изобарического сжатия. Радиатор часто называют конденсатором, т.к. в нём фреон, находящийся под высоким давлением, превращается в жидкость. Это происходит при комнатной температуре. Далее уже жидкий фреон поступает в испаритель.

3 → 4: В испарителе поступившая жидкость расширяется. Её давление и температура падают. При пониженном давлении жидкий фреон начинает кипеть и испаряться даже при температуре ниже 0°C.

4 → 1: Морозильник. Теплота необходимая для испарения фреона отбирается от стенок морозильника, т.е. от продуктов, лежащих в ней, вызывая их охлаждение. После этого уже газообразный фреон снова попадает в компрессор и цикл повторяется.

✚ В других ситуациях наиболее важным для нас является возможность теплового насоса повышать температуру нагревателя T_1 . Т.е. то, что тепловой насос, забирая тепло от менее нагретого тела, будет передавать его более нагретому, ещё больше повышая его температуру. Такая работа теплового насоса получила название режима *динамического отопления*, характеризуемого коэффициентом динамического отопления.

$$k_{\text{д.от.}} = \frac{Q_1}{A'} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}.$$

В случае, когда динамическое отопление работает по обратному циклу Карно, его коэффициент зависит только от температур нагревателя и холодильника:

$$k_{\text{д.от. Карно}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}.$$

Рассмотрим сплит-систему (кондиционер «зима-лето») как пример динамического отопления:

- нагреватель тепловой машины – квартира, зимой в домах не очень жарко $T_1 = (17^\circ\text{C}) = 290 \text{ K}$
- холодильник тепловой машины – улица, в не очень суровую зиму $T_2 = (-3^\circ\text{C}) = 270 \text{ K}$

$$k_{\text{д.от.}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{290}{290 - 270} \approx 15.$$

Значит, затрачивая 1 кВт электрической мощности (потребляя из электросети) на работу электродвигателя в нашем тепловом насосе, мы будем получать от него тепло для обогрева комнаты в **15** раз больше. Такого эффективного обогрева вы не получите ни от одной батареи будь она: масляным радиатором, электрическим обогревателем или обыкновенной батареей парового отопления. Принцип работы такой системы был описан ещё в 19 веке, но только в настоящее время появились бытовые системы динамического отопления.